

Influence de ferrites de Ni-Zn dans la miniaturisation d'antennes pour applications DVB-H

A. Chevalier¹, E. Le Guen^{1,2}, A.-C. Tarot², B. Grisart¹, D. Souriou³, A. Thakur⁴, P. Queffelec¹, J.-L. Mattei¹

¹Lab-STICC, CNRS, Université de Bretagne Occidentale, Brest, France

²IETR, CNRS, Université de Rennes 1, Rennes, France

³CEA-LETI/DIHS/LCMS, Grenoble, France

⁴Spintronic Lab Center for Nanostorage Research, National Taiwan University, Taipei, Taiwan

mattei@univ-brest.fr : correspondant principal

Résumé

Cette étude se situe dans la problématique de la miniaturisation d'antennes dans le domaine de fréquences 470-862MHz, correspondant à la norme DVB-H. Dans cet objectif les propriétés magnétostrictives de ferrites de Ni-Zn sont mises à profit pour étendre jusqu'à 1 GHz leur potentialité d'application comme substrats d'antennes. Les matériaux réalisés présentent des tangentes de pertes magnétiques qui restent inférieures à $5 \cdot 10^{-2}$ dans la gamme de fréquence 100MHz-1GHz, avec une perméabilité constante et un indice optique proche de 3 pour le matériau présenté. Cette valeur pourra être aisément augmentée jusqu'à 4,5 environ. Ces propriétés prédisposent ces matériaux aux applications dans le domaine UHF.

1. Introduction

Les études actuelles sur la miniaturisation d'antennes pour applications de type DVB-H (Digital Video Broadcasting Handheld), correspondant à la gamme de fréquence 470-862MHz, montrent que les techniques classiques utilisées à ce jour pour réduire la taille des antennes ont atteint leur limite théorique [1]. En effet les dimensions de l'antenne étant inversement proportionnelles à $\sqrt{\epsilon \cdot \mu}$, la diminution de la taille de l'antenne passe généralement par l'utilisation de matériaux purement diélectriques à forte permittivité [2], ceci au détriment des performances de l'antenne notamment de sa bande passante et de son efficacité [3,4]. Cet obstacle peut être surmonté par l'utilisation en tant que substrats de matériaux magnétodiélectriques, qui associent une perméabilité magnétique à une permittivité diélectrique [1]. On peut attendre de l'association de ces propriétés une amélioration notable des performances de l'antenne.

En effet, pour un substrat non dispersif sans perte, la bande passante et l'efficacité d'une antenne patch déposée sur un matériau magnétodiélectrique de hauteur h sont accrues lorsque le rapport μ / ϵ est supérieur à l'unité [5] :

$$BP \approx \frac{96(h / \lambda_0) \sqrt{\mu / \epsilon}}{\sqrt{2}(4 + 17\sqrt{\mu \epsilon})}$$

Dans le cas plus réaliste d'un substrat magnétodiélectrique qui présente des pertes magnétiques ($\text{tg}\delta_\mu$) et diélectriques ($\text{tg}\delta_\epsilon$), il a été établi [3] qu'une augmentation de la bande passante est également associée à l'existence des pertes:

$$BP = \frac{1}{\sqrt{2}} (240 \frac{d}{w} G_r^{patch} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} + \text{tg}\delta_\mu + \text{tg}\delta_\epsilon)$$

L'existence des pertes contribue à un abaissement de l'efficacité η , mais cette dégradation est compensée par une perméabilité supérieure à l'unité [3]:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\text{tg}\delta_\mu + \text{tg}\delta_\epsilon}{240 G_r^{patch}} \frac{W}{d} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}}}$$

Pour la réalisation de substrats dans la bande de fréquence visée, nous nous sommes orientés vers la famille des ferrites spinelles. Par comparaison avec les ferrites hexagonaux -que leurs fréquences de résonance gyromagnétiques élevées prédisposent aux applications au delà du GHz- les ferrites spinelles présentent des fréquences de résonance gyromagnétiques relativement basses (400MHz).

En effet les ferrites sont très souvent proposés sous forme de milieu massif dense, avec des fréquences de

Résonance Ferrimagnétique (RFM) assez basses, ce qui limite leurs applications aux fréquences largement inférieures à 1GHz. Cependant, nous avons montré qu'après un traitement thermique approprié les poudres de ferrites de Ni-Zn peuvent être utilisées avec succès dans le cadre d'applications antennaires jusqu'à 700 MHz, avec des niveaux de perméabilités supérieurs à ceux des hexaferrites [6-11].

Dans le but d'étendre encore cette gamme de fréquence, nous proposons de mettre à profit les propriétés de magnétostriction des ferrites spinelles. Il est en effet connu que les propriétés magnétiques d'un matériau magnétostrictif sont sensibles aux contraintes mécaniques appliquées. En particulier la valeur de la RFM augmente proportionnellement aux contraintes appliquées ce qui permet de repousser la zone d'apparition des pertes gyromagnétiques.

2. Protocole expérimental

Les ferrites Nickel-Zinc étudiés sont synthétisés par voie de co-précipitation, plusieurs compositions de type $Ni_xZn_{1-x}Fe_2O_4$ et $Ni_{0.5}Zn_{0.3}Co_{0.2}In_{0.02}Fe_{1.98}O_4$ ont été étudiés. La dimension des particules obtenues par cette voie chimique est de l'ordre de 30nm [6]. Les poudres magnétiques sont mélangées à une résine époxy avec une fraction volumique variable C pour assurer la tenue mécanique des échantillons. La valeur de cette concentration en matière magnétique est choisie au delà de celle du seuil de percolation C_p . En effet pour des concentrations $C < C_p$ les champs démagnétisant au niveau des grains augmentent et accroissent le niveau de pertes magnétiques [12,13]. La valeur de C_p est proche de 25%-30% lorsque les particules sont de forme sphérique [13,14]. Pour cette raison, nous avons préparé des échantillons avec une concentration en matière magnétique autour de $C=0,5$. De plus, il a été montré qu'au dessus de ce seuil la RFM ne dépend pas de la concentration et reste constante [15,16].

Les mélanges de poudres magnétiques et de résine époxy sont ensuite matricés au format APC7 par pression uniaxiale à froid. Notre protocole consiste à introduire volontairement des contraintes dans les échantillons en augmentant la force de matriçage sur une plage de pression allant de 10 MPa à 160 MPa.

Pour chaque échantillon pressé, la perméabilité et la permittivité sont mesurées en ligne coaxiale à l'aide d'un analyseur de réseaux Packard HP 8753 ES dans la gamme de fréquence [10 MHz-6GHz]. La RFM est alors repérée par le maximum de la perméabilité imaginaire.

3. Résultats expérimentaux et discussion

La figure 1 présente l'évolution de la RFM en fonction de la pression de matriçage appliquée pour la composition $Ni_{0.5}Zn_{0.3}Co_{0.2}In_{0.02}Fe_{1.98}O_4$.

On peut distinguer deux zones. Une première zone à basse pression associée à un plateau où la RFM reste constante. Une seconde zone à partir de 50 Mpa, où la

RFM suit une augmentation linéaire en fonction la pression de matriçage appliquée.

Ce premier plateau correspond aux contraintes résiduelles engendrées durant le processus de fabrication des poudres. et qui subsistent avant le pressage. Ces contraintes résiduelles rendent particulièrement difficile la mesure de la fréquence de Résonance Ferrimagnétique Naturelle (RFM naturelle, fréquence de résonance d'origine magnétocristalline exclusivement). En effet elles masquent partiellement les propriétés magnétiques intrinsèques en introduisant un terme d'anisotropie supplémentaire qui s'ajoute au terme d'anisotropie magnétocristalline.

Cependant il est possible de remonter à la valeur de la RFM naturelle par extrapolation de la partie linéaire de la seconde zone (figure 1). La valeur F_0 ainsi obtenue correspond à la valeur de la fréquence de résonance que présenterait ce matériau en l'absence de contraintes. Cette méthode de mesure de F_0 a été validée expérimentalement par l'étude de plusieurs ferrites Ni-Zn aux propriétés bien connues. Pour la composition présentée dans ce travail contenant du Cobalt, la valeur F_0 de la RFM naturelle est de 2,7 GHz., bien supérieure aux valeurs des ferrites de Ni-Zn classiques.

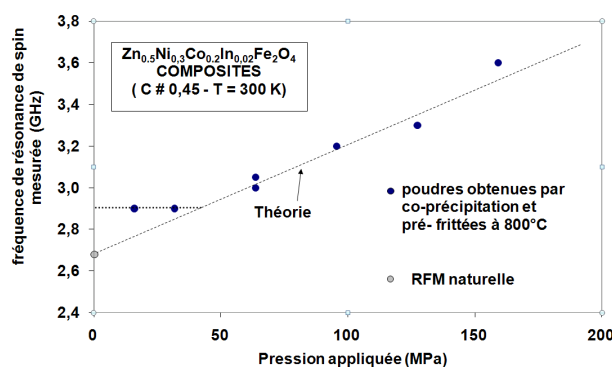


Figure 1 : Effets de la pression de matriçage sur la RFM de matériaux composites $Ni_{0.5}Zn_{0.3}Co_{0.2}In_{0.02}Fe_{1.98}O_4$.

L'augmentation linéaire de la fréquence de résonance en fonction de la pression de matriçage peut s'interpréter de la manière suivante. En supposant que l'effet de la magnétostriction soit isotrope, l'énergie magnétique totale est la somme de l'énergie magnétoélastique et de l'énergie d'anisotropie magnétocristalline. :

$$E = (K + 3/2 \lambda_s \sigma_i) \sin^2 \varphi.$$

où K est la constante d'anisotropie magnétocristalline, σ_i la contrainte locale exercée sur les grains (corrélée à la pression de matriçage), λ_s la constante de magnétostriction à saturation et φ l'angle entre l'aimantation et l'axe facile.

L'énergie du champ effectif équivalent H_{eff} peut s'écrire:

$$E = -\mu_0 M_s H_{eff} \cos \varphi$$

Pour les ferrites étudiés il y a quatre axes faciles distribués sur les diagonales de la maille cubique. Le calcul sur l'axe [111] conduit à un champ effectif de la forme :

$$H_{eff} = \frac{4}{3} \frac{(K + 3/2 \lambda_S \sigma_i)}{\mu_0 M_S} \quad (1)$$

La fréquence ferrimagnétique de résonance F_R est liée à ce champ effectif par la relation de Larmor :

$$F_R = \gamma \cdot H_{eff} \quad (2)$$

où γ est le rapport gyromagnétique de l'électron ($\gamma = 35.12 \text{ MHz/K.A.m}^{-1}$).

En combinant les relations (1) et (2) la RFM en présence de contraintes s'écrit :

$$F_R = F_0 + \frac{2\gamma}{\mu_0} \left(\frac{\lambda_S}{M_S} \right) \sigma_i \quad (3)$$

Où F_0 représente la fréquence RFM naturelle du matériau, directement reliée au champ d'anisotropie magnétocristalline H_K par :

$$F_0 = \gamma \cdot H_K$$

L'intensité des contraintes vue par les grains n'est cependant pas celle directement appliquée lors du matriçage. Les grains ne remplissent pas tout l'espace et les surfaces de contacts sont complexes et probablement très réduites. (Figure 2).

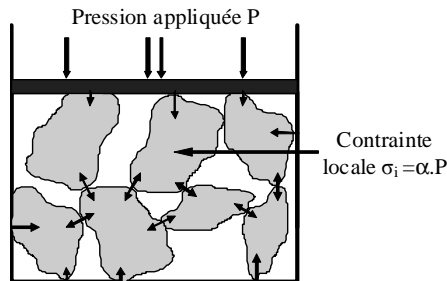


Figure 2 : contrainte locale au niveau des grains

La variation linéaire observée sur les résultats expérimentaux nous montre que les contraintes locales demeurent proportionnelles à la pression P de matriçage. Ainsi, en introduisant un coefficient de proportionnalité α entre les contraintes locales et la pression de matriçage :

$$\sigma_i = \alpha \cdot P$$

nous pouvons réécrire la relation (3) donnant la RFM :

$$F_R = F_0 + \alpha \frac{2\gamma}{\mu_0} \left(\frac{\lambda_S}{M_S} \right) P \quad (4)$$

Le coefficient α dépend de la porosité, de la taille, de la forme des particules et du degré de compactage, il est déterminé de façon expérimentale.

Les résultats présentés ici ainsi que des études précédentes [18] sur les ferrites $\text{Ni}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (x variant de 0.3 à 0.7) ont permis de déterminer la valeur expérimentale α égale à 2.

La relation (4) nous montre qu'il est possible de remonter à la RFM naturelle par extrapolation à contraintes nulles mais également de déterminer par exemple le coefficient de magnétostriction lorsque l'aimantation à saturation est connue. C'est ce que nous avons fait pour la composition à base de Co pour laquelle peu de valeurs existent dans la littérature. Le tableau 1 résume les valeurs des paramètres magnétiques observés sur les compositions étudiées dans ce travail. Ces valeurs sont en accord avec les résultats publiés [19, 20].

Nous voyons que, l'ajout de cobalt et la substitution par l'indium dans les ferrites de nickel-zinc conduisent à une augmentation de l'aimantation à saturation et du champ effectif d'anisotropie donc également de la RFM. Cette composition est donc bien adaptée à la montée en fréquence.

Tableau 1

λ_S , F_0 et H_K obtenus des mesures de perméabilité sur les matériaux composites

Echantillon	M_S (kA/m)	λ_S $\times 10^6$	F_0 (GHz)	H_K (kA/m)
$\text{Ni}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{Fe}_2\text{O}_4$	345	-6.5	0.27	7.5
$\text{Ni}_{0.7}\text{Zn}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$	410	-17.5	0.75	21.3
$\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.3}\text{Co}_{0.2}\text{In}_{0.02}\text{Fe}_{1.98}\text{O}_4$	420	-21	2.68	76.2

La figure 3 présente les spectres de perméabilité complexe ($\mu = \mu' - j\mu''$) obtenus pour deux pressions de matriçage. L'effet de l'augmentation des contraintes induite est clairement visible et se traduit par une augmentation de 700 MHz de la valeur de la RFM. On pourrait s'étonner de cette augmentation de la résonance sans conséquence sur la partie statique de la perméabilité. Cela est dû à la diminution de la porosité de l'échantillon qui compense la baisse de susceptibilité.

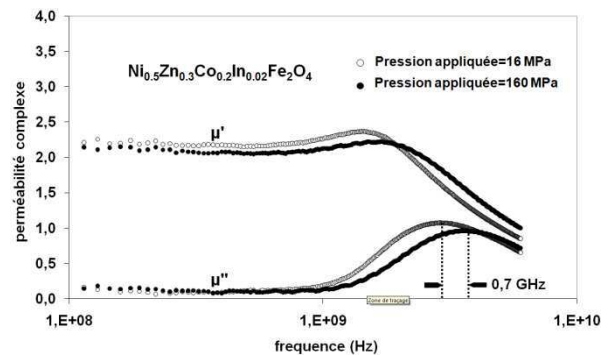


Figure 3 : Effet de la pression de matriçage sur la perméabilité ($\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.3}\text{Co}_{0.2}\text{In}_{0.02}\text{Fe}_{1.98}\text{O}_4$)

La figure 4 présente l'évolution des pertes magnétiques en fonction de la fréquence pour les deux valeurs de pression de matriçage. Nous constatons que le début d'apparition de la zone des pertes gyromagnétiques est nettement repoussé sous l'effet des contraintes induites par la pression de matriçage.

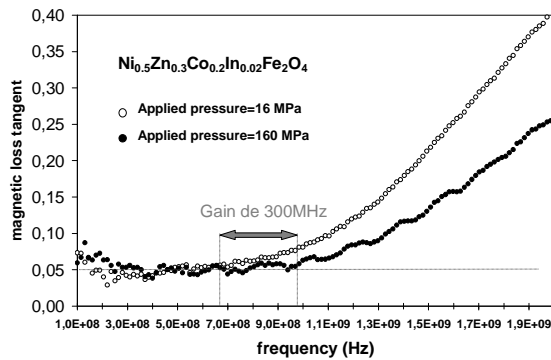


Figure 4 : Effet de la pression de matriçage sur les pertes magnétiques

Ce matériau pourrait être exploité pour un même niveau de perte à une fréquence supérieure de 300MHz, son utilisation pourrait ainsi être envisagée jusqu'à une fréquence de 1 GHz.

4. Conclusion

Nous avons montré que le domaine des faibles pertes magnétique des ferrites de Ni-Zn peut être étendu jusqu'à des fréquences proches de 1 GHz par l'utilisation des propriétés de magnétostriction des ces matériaux. En effet, l'ajout de contraintes lors du processus de fabrication permet d'augmenter l'anisotropie totale et donc de repousser la zone d'apparition des pertes gyromagnétiques. Une application envisageable concerne la miniaturisation d'antennes dans la gamme de fréquence (462-870MHz) norme DVB-H (Digital Video Broadcast Handled).

5. Bibliographie

[1] P.Ikonen, S.I. Maslovski, C.R. Simovski, S.A. Tretyakov, "On artificial Magnetodielectric Loading for Improving the impedance Bandwidth properties of Microstrip Antennas", IEEE Antennas and propagation, vol.54, p.1654-1662, 2006

[2] J. Van Bladel, "On the resonances of a dielectric resonator of very high permittivity", IEEE Trans. Micro. Theo.and Tech., Vol. 23, No. 2, pp. 199-208, Feb. 1975.

[3] C. Niamien, S. Collardey, A. Sharaiha, K. Madjoubi, "Compact expressions for efficiency and bandwidth of patch antennas over lossy magnetodielectric materials", IEEE Antennas and W. P. Letters, vol.10, pp. 63-66,2011

[4] F.R. Harrington, "Effect of Antenna Size on Gain, Bandwidth and Efficiency", *Journal of Research of the National Bureau of Standard*- D. Radio Propagation, vol. 64D, pp. 1 - 12, 1960.

[5] Hansen, R. C. and Burke, M., "Antennas with magneto-dielectrics," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 26, pp.75-78, July 2000.

[6] D. Souriou, J. L. Mattei, A. Chevalier, and P. Quéffelec, "Influential parameters on magnetic properties of Nickel Zinc ferrites for antenna miniaturisation", J. of Appl. Phys., vol. 107, Issue 9, p 09A518, May 2010.

[7] L. Huitema, M. Hajj, T. Monédière, D. Souriou, A. Chevalier, J-L. Mattei, P. Queffelec, " Overview of Reconfigurable and Compact Antennas Using a Magneto-dielectric Material", Progress In Electromagnetics Research Symposium, Marrakesh, Morocco, 20-23 March 2011.

[8] J.F. Pintos, A. Louzir, P. Minard, J. Perraudau, J.L. Mattei, D. Souriou, P. Queffelec, "Ultra-miniature UHF antenna using magneto-dielectric material", 14th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics & American Electromagnetics Conference (ANTEM-AMEREM), 5-8 July 2010

[9] B. Jannier, C. Niamien, S.Collardey, A. Sharaiha, K. Mahdjoubi, "DVB-T Reception Test with Ultra Miniature CPW Antenna" Eucap2011: the 5th European Conference on Antennas and Propagation, Rome, Italy, on 11-15 April 2011

[10] F. Ferrero, A. Chevalier, J.M. Ribero, R. Staraj, J.L. Mattei, P. Queffelec, "Influence of a magneto-dielectric resonator on DVB-H antenna performances", European Conf. on Antenna and Propagation (EuCAP), Rome, 11-15 April 2011

[11] J.-L. Mattei, P. Queffelec, L. Huitema, J.-F. Pintos, Ph. Minard, A. Sharaiha; B. Jamnier, F. Ferrero, R. Staraj, D. Souriou, A. Thakur, "Suitability of Ni-Zn Ferrites Ceramics with Controlled Porosity As Granular Substrates for Mobile Handset Miniaturized Antennas", Soumis à IEEE Trans. On Magnetics.

[12] M. Anhalt, B. Weidenfeller, "Permeability of soft magnetic FeCoV-PP composites for varying filler fractions", IEEE Trans.on Mag. vol. 46, 440-442, 2010

[13] J.-L. Mattei, M.Le Floc'h, " Percolative behaviour and demagnetizing effects in disordered heterostructures ", J. Magn. and Magn. Mater., vol. 257, 335-345, 2003

[14] M. Anhalt, B. Weidenfeller, J.-L. Mattei, "Inner demagnetizing factor in polymer bonded soft magnetic composites", J. Magn. and Magn. Mater., vol. 320, e844-e848, 2008

[15] J.-L. Mattei, M.Le Floc'h, «Effects of the magnetic dilution on the ferromagnetic resonance of disordered heterostructures ", J. Magn. and Magn. Mater., vol. 264, 86-94, 2003;

[16] A. Chevalier and M. Le Floc'h, "Dynamic permeability in soft magnetic composite materials", J. Appl. Phys., vol;90, N°7, pp. 3462-3466, 2001

[17] S. Chikazumi, "Physics of magnetism", J. Willey and sons, New-York, London, 1964

[18] A. Chevalier, Thèse de Doctorat, UBO, 1998

[19] S.R. Murthy et T.S. Rao, Phys. Sta. Sol. (a), vol.90, 631, 1985

[20] A. Globus, P. Duplex, "Effective anisotropy in polycrystalline materials. Separation of components", J. Appl.Phys.vol.39,N°2,pp.727-729,1968